

*“РІЗДВЯНІ ДИСКУСІЇ 2022/23”,
ПРИСВЯЧЕНІ 150-РІЧЧЮ КАФЕДРИ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ
(Львів, 22–23 грудня 2022 року)*

*“CHRISTMAS DISCUSSIONS 2022/23” DEDICATED TO THE 150th ANNIVERSARY OF THE
DEPARTMENT FOR THEORETICAL PHYSICS
(Lviv, December 22–23, 2022)*

22–23 грудня 2022 року на кафедрі теоретичної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка відбувалися 26-і Різдвяні наукові дискусії, присвячені 150-річчю кафедри теоретичної фізики. Традиційно предметом обговорення були проблеми квантової механіки, фазових переходів, статистичної фізики, астрофізики, космології, теорії складних систем, фізики твердого тіла, математики та історії науки. Усі доповіді викликали зацікавлення аудиторії та спричинили активні дискусії. Нижче подаємо анотації виголошених доповідей.

COFFEE-RING FORMATION THROUGH THE USE OF THE MULTI-RING MECHANISM GUIDED BY THE SELF-ASSEMBLY OF MAGNETIC NANOPARTICLES

M. Marć, W. Wolak, A. Drzewiński, M. R. Dudek
Institute of Physics, University of Zielona Góra, Poland

The control of the mechanism leading to the appearance of ring-shaped stains from the dried liquid colloidal droplets has been the subject of intense studies over the last 25 years. This stems from the immense significance of this effect for technological applications. One of the key open topics in this field is the emergence of a regular multi-ring deposit from the dried droplet. Here, we show that magnetic nanoparticles in a drying magnetic liquid droplet can self-assemble into a multi-ring deposit structure, and even more importantly, a magnetic field can be turned on to control the underlying processes. The magnetic liquid is prepared as an aqueous suspension of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles stabilized with (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) and its droplets are placed on a low-density polyethylene (LDPE) film. The results of this work are expected to be very promising in the case of multiple applications including ink-jet printing methods and 2D printed electronics.

[1] M. Marć, W. Wolak, A. Drzewiński, M. Dudek, *Sci. Rep.* **12** 20131 (2022).

CONCEPT OF THE CONTROLLABLE DUAL AUXETICITY OF THE HIERARCHICAL MECHANICAL METAMATERIAL CONSISTING OF RE-ENTRANT STRUCTURAL MOTIFS

K. K. Dudek^{1,2}, J. A. Iglesias Martínez¹, M. Kadic¹

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon 25030, France

² Institute of Physics, University of Zielona Góra, Poland

In work [1], a novel hierarchical mechanical metamaterial is proposed that consists of re-entrant truss-lattice elements. It is demonstrated that this system can deform very differently and can exhibit a versatile extent of the auxetic behavior depending on a small change in the thickness of its hinges. In addition, depending on which hierarchical level is deforming, the whole structure can exhibit a different type of auxetic behavior that corresponds to a unique deformation mechanism. This results in a dual auxetic structure where the interplay between the two auxetic mechanisms determines the evolution of the system. It is also shown that depending on the specific deformation pattern, it is possible to observe a very different behavior of the structure in terms of the frequencies of the waves that can be transmitted through the

system. In fact, it is shown that even a very small change in the parametric design of the system may result in a significantly different bandgap formation, which can be useful in the design of tunable vibration dampers or sensors. The possibility of controlling the extent of the auxeticity also makes the proposed metamaterial very appealing from the point of view of protective and biomedical devices.

[1] K. K. Dudek, J. A. Iglesias Martínez, M. Kadic, *Phys. Status Solidi B* **259**, 2200404 (2022).

COMPLEXITY AND CRITICALITY OF STRUCTURALLY DISORDERED MAGNETS

M. Dudka^{1,2}, *M. Krasnytska*^{1,2,3}, *J. J. Ruiz-Lorenzo*^{4,5}, *Yu. Holovatch*^{1,2,6}

¹Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,

² \mathbb{L}^4 Collaboration & Doctoral College for the Statistical Physics of Complex Systems,
Leipzig–Lorraine–Lviv–Coventry

³Laboratoire de Physique et Chimie Théoriques, Université de Lorraine – CNRS,
Vandoeuvre-les-Nancy, France

⁴Departamento de Física and Instituto de Computación Científica Avanzada,
Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain

⁵Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos, Zaragoza, Spain

⁶Centre for Fluid and Complex Systems, Coventry University, United Kingdom
hol@icmp.lviv.ua

We discuss the problem of the influence of structural disorder on criticality. As a case study, we consider the impact of a weak quenched disorder on a magnetic phase transition. Given that this problem itself has a long history [1], we summarize it in a brief introduction and then we concentrate on our main question of interest.

Usually, the impact of structural disorder on a magnetic phase transition is analyzed for a solid solution of a magnet with its non-magnetic isomorph. Classical examples are given by solid solutions $\text{Fe}_x\text{Zn}_{1-x}\text{F}_2$, $\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{F}_2$. A distinct feature of our analysis is consideration of changes in the magnetic phase transition when both components are magnets. To this end, we make use of a generalized Ising model suggested recently [2] in a context of complex systems. We use the field theoretical renormalization group approach to analyze its effective and asymptotic critical behavior.

We show that it is the structural disorder itself that causes changes in the universal critical behavior, regardless of whether it has the form of a random mixture of magnetic and non-magnetic constituents or of two different magnetic compounds [3].

[1] See e.g. *Order, Disorder and Criticality. Advanced Problems of Phase Transition Theory*, Vol. 7, edited by Yu. Holovatch (World Scientific, Singapore, 2023), and other volumes of this series: <https://doi.org/10.1142/12968>.

[2] M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna *J. Phys.: Complexity* **1**, 035008 (2020); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2632-072X/abb654/meta>; *Entropy* **23**(9), 1175 (2021); <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/9/1175>.

[3] M. Dudka, M. Krasnytska, J. Ruiz-Lorenzo, Yu. Holovatch, preprint arXiv:2207.13655; <https://arxiv.org/abs/2207.13655>.

PRECISION OF DETECTION OF THE ENERGY LEVELS OF SPIN SYSTEMS ON A QUANTUM COMPUTER BY PROBE SPIN EVOLUTION

Kh. P. Gnatenko, V. M. Tkachuk

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,

Ivan Franko Lviv National University of Lviv

khrystyna.gnatenko@gmail.com, voltkachuk@gmail.com

A method for detecting the energy levels of a spin system based on studies of the evolution of a probe spin is considered [1]. The mean value of a probe spin can be detected on a quantum device at fixed moments of time. We show that the errors of calculating the energy levels related to the finite step and the duration of time are very small. In addition, the method gives correct results even in the case of great

quantum errors. Therefore, the detection of energy levels of a spin system based on studies of the evolution of a probe spin is effective even in the case of noisy quantum computers.

[1] Kh. P. Gnatenko, H. P. Laba, V. M. Tkachuk, *Eur. Phys. J. Plus.* **137**, 522 (2022).

FINITE-SIZE SCALING FOR THE ISING MODEL ABOVE THE UPPER CRITICAL DIMENSION

Yu. Honchar^{1,2,4}, *B. Berche*^{3,4}, *Yu. Holovatch*^{1,2,4}, *R. Kenna*^{2,4}

¹Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,

²Centre for Fluid and Complex Systems, Coventry University, United Kingdom

³Laboratoire de Physique et Chimie Théoriques, Université de Lorraine – CNRS,
Vandoeuvre-les-Nancy, France

⁴L⁴ Collaboration & Doctoral College for the Statistical Physics of Complex Systems,
Leipzig–Lorraine–Lviv–Coventry

Above the upper critical space dimension, it is widely accepted that the critical scaling exponents assume their mean field values. However, in this case the hyperscaling relation which contains the dimensionality of space is broken. In addition, the mean field exponents do not correspond to the finite-size scaling (FSS). One of the theories that aimed to explain the FSS is a Gaussian fixed point (the so-called G-scaling), in which the interaction in the Landau–Ginzburg–Wilson action is set to zero. Multiple Monte Carlo simulations of the Ising model on hypercubic lattices (where the upper critical dimension $d_{uc} = 4$) show that under the periodic boundary conditions, Gaussian fixed point exponents do not correspond to FSS [1]. Another theoretical approach proposed by Berche and Kenna introduces into the hyperscaling a new exponent φ (“koppa”), which is equal to 1 at dimensions $d \leq d_{uc}$, and $\varphi = d/d_{uc}$ for higher dimensions. Q-scaling, named after the letter φ , is confirmed for lattices with periodic boundary conditions. We carry out extensive numerical simulations using the Wolff algorithm to investigate the FSS on the five-dimensional hypercubic lattices with free boundary conditions and show that, unlike systems with PBCs, it is closer to G-scaling.

[1] B. Berche, T. Ellis, Yu. Holovatch, R. Kenna, *SciPost Phys. Lect. Notes*, 60 (2022); <https://scipost.org/SciPostPhysLectNotes.60>

MODELING THE BEHAVIOR OF ANTIBODY FLUID IN A CROWDED ENVIRONMENT: EFFECTS OF THE OBSTACLE–ANTIBODY ATTRACTION

*T. V. Hvozď*¹, *Yu. V. Kalyuzhnyi*¹, *V. Vlachy*²

¹Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,

²Faculty of Chemistry and Chemical Technology, University of Ljubljana, Slovenia

A model antibody fluid in a random hard sphere porous media mimicking the system of antibodies in a crowded cellular environment is proposed [1]. One of the processes that may take place in such a system, in particular the attractive interaction between antibody molecules and the porous medium obstacles, has been studied [2]. The influence of such an attractive interaction on the phase behavior of the model, percolation, cluster size distributions of proteins, and the second virial coefficient of the model was studied. An important achievement of this research is that a new mechanism of the re-entrant phase behavior of such an associating system has been obtained [3]. The reason for such re-entrant phase coexistence, when the same fluid density occurs at two different temperatures, is the attractive interaction between the fluid and the porous medium obstacles. Due to the protein–obstacle interaction, a layer of mutually bonded antibodies around the obstacles is formed and the corresponding network becomes strongly nonuniform, with the local distribution of antibodies centered on the obstacles. In other words, the distribution of the antibodies in the network is governed by the distribution of the obstacles. Features described in this study may open up possibilities of producing equilibrium gels with predefined nonuniform distribution

of particles and indicate how complicated the phase behavior of biological macromolecules in a crowded cellular environment may be.

-
- [1] T. Hvoz, Yu. V. Kalyuzhnyi, V. Vlachy, *Soft Matter* **16**, 8432 (2020).
[2] T. Hvoz, Yu. V. Kalyuzhnyi, V. Vlachy, *Soft Matter* **18**, 9108 (2022).
[3] T. V. Hvoz, Yu. V. Kalyuzhnyi, V. Vlachy, P. T. Cummings, *J. Chem. Phys.* **156**, 161102 (2022).

APPLICATION OF QUANTUM WAVE IMPEDANCE METHOD TO SYSTEMS WITH ZERO-RANGE POTENTIALS

Orest Hryhorchak

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,

Ivan Franko Lviv National University of Lviv

Orest.Hryhorchak@lnu.edu.ua

Zero-range potentials, in particular δ -potential, are widely used for modeling real quantum mechanical systems, namely quantum waveguides spectral filters, infinitesimally thin sheets, an entanglement of polymers, Bose–Einstein condensation in a harmonic trap etc. The idea to enrich a δ -potential with its first derivative extended the scope of physical systems which can be modeled using this type of potentials. One example is multilayer structures, in particular a typical transistor in a zero-thickness limit, in this case called a “point” transistor.

Our aim is to reformulate the problem of an the investigation of quantum mechanical systems with zero-range potentials using a quantum wave impedance method. As a result, both the scattering and bound states problems are solved for systems of δ and $\delta - \delta'$ potentials using the quantum mechanical wave impedance approach. We also demonstrated the advantages of the proposed method, especially in the area of numerical calculations of quantum-mechanical systems modeled with zero-range potentials.

OPTICAL SPECTROSCOPY OF THE $\text{PbI}_2\text{:Fe}$, $\text{PbI}_2\text{:Ni}$, AND $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ CRYSTALS

I. I. Kindrat¹, A. Drzewiecki¹, O. V. Rybak², B. V. Padlyak^{1,3}

¹University of Zielona Góra, Institute of Physics, Division of Spectroscopy of Functional Materials, Poland

²Lviv Polytechnic National University, Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences, Department of General Physics, Ukraine

³Vlokh Institute of Physical Optics, Department of Optical Materials, Lviv, Ukraine

This work is focused on the studies of optical absorption and photoluminescence spectra of the $\text{PbI}_2\text{:Fe}$, $\text{PbI}_2\text{:Ni}$ and $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystals. Direct-bandgap layered PbI_2 semiconductor crystals doped with Fe, Ni, and Mn were grown from the vapour phase in a closed system under the vapour pressure of over-stoichiometric iodine under the technological conditions described in [1]. Optical absorption and photoluminescence spectra were recorded at room temperature ($T = 295$ K).

The optical absorption spectra of all investigated crystals reveal fundamental absorption edge about 510–530 nm. The $\text{PbI}_2\text{:Fe}$ and $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystals in the UV-violet spectral range additionally show ligand-to-metal charge transfer bands related to the FeI_4^- and MnI_4^{2-} tetrahedral complexes. Charge transfer transitions of the FeI_4^- complex were also observed in the luminescence emission and excitation spectra of the $\text{PbI}_2\text{:Fe}$ crystal.

The luminescence emission spectra of the $\text{PbI}_2\text{:Ni}$ crystal show a broad emission band with a maximum about 540 nm ascribed to a fast band-to-band recombination mechanism. The luminescence intensity of the $\text{PbI}_2\text{:Ni}$ crystal weakly depends on the excitation wavelength.

The luminescence emission spectra of the $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystal, besides intrinsic luminescence peaked at 530–540 nm, also show a weakly-resolved emission band about 600 nm assigned to the Mn^{2+} ($3d^5$, ${}^6\text{S}_{5/2}$) ions. The excitation spectrum of $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystal shows several bands ascribed to the $3d - 3d$ transitions of Mn^{2+} ions. Analysis of the crystal field splitting for Mn^{2+} ions in the $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystal was carried out as well as the Racah parameters (B , C) and the crystal field strength (Dq) for them were calculated. The Tanabe–Sugano diagram for Mn^{2+} ions in the $\text{PbI}_2\text{:Mn}$ crystal was built.

-
- [1] O. V. Rybak, Yu. O. Lun', I. M. Bordun, M. F. Omelyan, *Inorgan. Mater.* **41**, 1124 (2005).

PHASE TRANSITIONS ON COMPLEX NETWORKS: MODELS, METHODS, FEATURES

Mariana Krasnytska^{1,2,3}

¹Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,

²L⁴ Collaboration & Doctoral College for the Statistical Physics of Complex Systems,
Leipzig–Lorraine–Lviv–Coventry

³Laboratoire de Physique et Chimie Théoriques, Université de Lorraine – CNRS,
Vandoeuvre-les-Nancy, France

Studies of critical behavior of spin models have already a long history. However, they became even more relevant with the development of network science and interdisciplinarity. Many natural or man-made systems are better described by the topology of a network than a regular lattice. To give an example, spin models may describe processes in social communities if considering spins located on the nodes of a complex network. In this talk, I will present a brief review of our recent results obtained for classical spin models (the Potts model [1]) and some of their generalizations (the Ising model with variable spin/agent strengths [2], the Potts model with invisible states [3]) on graphs of different topology. We quantify our analysis by calculating different characteristics of critical behavior. Besides critical exponents, scaling functions and critical amplitude ratios are used to analyze the universality class of a given model [4]. Other features of critical behavior may be obtained when analyzing the partition function zeros location in a complex temperature or field plane. We have suggested to apply this method to analyze spin models on scale-free networks [5].

-
- [1] M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, *Condens. Matter Phys.* **16**, 23602 (2013); <http://www.icmp.lviv.ua/journal/zbirnyk.74/23602/abstract.html>.
 - [2] M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna, *J. Phys.: Complexity* **1**, 035008 (2020); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2632-072X/abb654/meta>; *Entropy* **23**, 1175 (2021); <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/9/1175>.
 - [3] M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna, *J. Phys. A: Math. Theor.* **49**, 255001 (2016); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1751-8113/49/25/255001>; P. Sarkanych, M. Krasnytska, *Phys. Lett. A* **383**, 125844 (2019); <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375960119306322>; *Condens. Matter Phys.* **1** (2023); <https://arxiv.org/abs/2211.14048>.
 - [4] M. Krasnytska, *Condens. Matter Phys.* **17**, 23602 (2014); <http://www.icmp.lviv.ua/journal/zbirnyk.78/23602/abstract.html>.
 - [5] M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna, *J. Phys. A* **39**, 135001 (2016); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1751-8113/49/13/135001>.

ENTANGLEMENT AND ENTANGLED STATES IN THE DIAMOND SPIN CLUSTER

A. R. Kuzmak

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,
Ivan Franko Lviv National University of Lviv
andrijkuzmak@gmail.com

The entanglement of the diamond spin systems in thermodynamic equilibrium has been studied in different papers (for, example, [1–4]). However, there are no studies of the entanglement behavior during the quantum evolution of such systems. We explore the evolution of a diamond spin-1/2 cluster in the external magnetic field, where two central spins are described by the anisotropic Heisenberg model and interact with two side spins via the Ising interaction. We separately investigate the entanglement of two central and two side spins. The entanglement between these pairs of spins is also studied. We obtain the conditions achieving maximally entangled states.

-
- [1] I. Bose, A. Tribedi, *Phys. Rev. A* **72**, 022314 (2005).
 - [2] A. Tribedi, S. Bose, *Phys. Rev. A* **74**, 012314 (2006).
 - [3] O. Rojas, M. Rojas, S. M. de Souza, J. Torrico, J. Strečka, M. L. Lyra, *Physica A* **486**, 367 (2017).
 - [4] A. Ghannadan, K. Karl'ova, J. Strečka, *Magnetochemistry* **8**, 11 (2022).

FORMATION OF THE HYDROGEN ABSORPTION LINE 21-cm IN DARK AGES AND COSMIC DAWN: SENSITIVITY TO COSMOLOGICAL AND FIRST LIGHT PARAMETERS

B. Novosyadlyj^{1,2}, Yu. Kulinich¹, V. Shulga^{2,3}

¹Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv,

²International Center of Future Science of Jilin University, China,

³Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine

We analyze the formation of the redshifted hyperfine structure 21 cm line of the hydrogen atom in the cosmological epochs such as Dark Ages ($20 < z < 200$), Cosmic Dawn ($10 < z < 20$), and Reionization ($6 < z < 10$). In order to study its sensitivity to the values of cosmological parameters, physical conditions and the composition of the intergalactic medium, the evolution of the sky-averaged differential brightness temperature in the line was calculated in various cosmological models. Variations in the depth of the Dark Ages absorption line at $z_{\max} \sim 80$ ($\nu \sim 18$ MHz) with variations in the cosmological parameters Ω_b , Ω_{cdm} , Ω_Λ , Ω_K and H_0 in the Λ CDM model are shown. The model with post-Planck parameters predicts a value of the differential brightness temperature in the center of the absorption line $\sim 30\text{--}40$ mK. It is also shown that the position and depth of the Cosmic Dawn absorption line at $10 < z < 20$ ($70 < \nu < 130$ MHz), due to the Wouthuysen–Field effect, is mainly determined by the spectral energy distribution of the first sources of light (or the model of the first light). If reionization occurs at $z_{\text{ri}} = 7 \pm 1$, then the differential brightness temperature at the center of this absorption line is $\sim 10\text{--}50$ mK. During the reionization at $6 < z < 10$ ($130 < \nu < 200$ MHz), emission with an amplitude of ~ 5 mK is possible. It is also shown that the temperature, density, and degree of ionization of the baryonic component are decisive in calculating the intensity of the 21 cm absorption/emission line from these epochs.

NEW EFFECTIVE LUMINESCENT MATERIALS BASED ON THE BORATE GLASSES CO-DOPED WITH RARE-EARTH IONS AND SILVER (A REVIEW)

B. V. Padlyak^{1,2}, I. I. Kindrat¹, V. T. Adamiv²

¹University of Zielona Góra, Institute of Physics,

Division of Spectroscopy of Functional Materials, Poland

²Vlokh Institute of Physical Optics, Department of Optical Materials, Lviv, Ukraine

In this lecture, we present the review of our recent articles devoted to the producing technology, spectroscopic studies, and potential applications of the borate glasses co-doped with rare-earth (*RE* = Eu, Sm) and silver (Ag) [1–3]. Borate glasses with basic chemical compositions similar to their well-known crystalline analogies, co-doped with *RE* (*RE* = Eu, Sm) and Ag, were studied in detail using the X-band electron paramagnetic resonance (EPR) and optical spectroscopy techniques (absorption, photoluminescence, decay kinetics, quantum yield) as well as the Judd–Ofelt theoretical analysis. Ag impurity was introduced into the glasses as AgNO_3 salt and highly-dispersed metallic silver in the amount 2.0 mol.%. Eu and Sm impurities were added to raw materials as Eu_2O_3 and Sm_2O_3 oxides of chemical purity (99.99%) in the amounts 0.5 and 1.0 mol.%.

The EPR spectra of paramagnetic centers (Ag^0 , Ag^{2+} , and Sm^{3+}) were identified. Optical absorption, photoluminescence, and decay kinetics of the Ag^+ , Eu^{3+} , and Sm^{3+} centers were analysed. A significant enhancement of RE^{3+} photoluminescence intensity in the *RE*–Ag co-doped borate glasses has been observed. This enhancement is explained by the excitation energy transfer from the Ag^+ ions and molecular-like Ag nanoclusters to the RE^{3+} ions as well as local field effects, induced by the surface plasmon resonance (SPR) of the Ag^0 metallic nanoparticles. In particular, the external quantum yield (QY) of the Eu^{3+} luminescence in the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Eu,Ag}$ glass (QY = 26.1%) is considerably greater (in 2.23 times) than that in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Eu}$ (QY = 11.7%) [2] and is close to the quantum yield of the Eu^{3+} luminescence in the well-known $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ commercial phosphor (QY = 29.5%). The absolute quantum yield of the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Sm,Ag}$ glass upon excitation at 402 nm significantly grows up to 29.1% in comparison with $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Sm}$ glass (QY = 20.4%) [1,3]. These results show that $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Eu,Ag}$ and $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Sm,Ag}$ glasses are promising orange-red luminescent materials for different applications, including UV – visible conversion layers for solar cells working in cosmic space and regions with intense UV sun radiation.

[1] B. V. Padlyak, I. I. Kindrat, R. Lisiecki, V. T. Adamiv, I. M. Teslyuk, *Adv. Mater. Lett.* **7**, 723 (2017).

[2] I. I. Kindrat, B. V. Padlyak, B. Kukliński, A. Drzewiecki, V. T. Adamiv, *J. Lumin.* **204**, 122 (2018).

[3] I. I. Kindrat, B. V. Padlyak, B. Kukliński, A. Drzewiecki, V. T. Adamiv, *J. Lumin.* **213**, 290 (2019).

**ВОЛОДИМИР ЛЕВИЦЬКИЙ ТА МАТЕМАТИЧНО-ПРИРОДОПИСНО-ЛІКАРСЬКА СЕКЦІЯ
НАУКОВОГО ТОВАРИСТВА ІМЕНІ ШЕВЧЕНКА**

О. Петрук

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача
НАН України, Львів

31 грудня 2022 року минає 150 років від уродин Володимира Левицького, який керував Математично-природописно-лікарською секцією Наукового товариства імені Шевченка. До 1939 року ця структурна одиниця НТШ координувала наукові студії українців у галузі точних та природничих наук. Секція була створена 11 травня 1893 року, тож навесні 2023 міне 130 років від цієї події. У своїй доповіді з нагоди цих двох ювілеїв хотів би висвітлити окремі аспекти діяльності секції та її очільника Володимира Левицького.

**ПРО НОВИЙ КЛАС УНІВЕРСАЛЬНОСТІ В СТРУКТУРНО НЕВПОРЯДКОВАНІЙ
 n -ВЕКТОРНІЙ МОДЕЛІ З ДАЛЕКОСЯЖНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ**

Д. Шаповал^{1,2}, М. Дудка^{1,2}, Ю. Головач^{1,2,3}

¹ Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів, Україна

² Співпраця \mathbb{L}^4 , Докторський коледж із статистичної фізики складних систем,
Ляйпціг–Лотарингія–Львів–Ковентрі, Європа

³ Центр дослідження плинних і складних систем, Університет Ковентрі,
Ковентрі, CV1 5FB, Велика Британія

Проаналізовано можливі зміни критичної поведінки багаточастинкової магнітної системи, викликані взаємними ефектами далекосяжної взаємодії та структурного безладу. Зокрема, досліджено межу стійкості ділянки, де нетривіальна критична поведінка n -векторної моделі з далекосяжною степеневу загасаючою взаємодією $J(x) \sim x^{-d-\sigma}$ (де d — вимірність простору, $\sigma > 0$ — контрольований параметр загасання взаємодії) зумовлена наявністю слабого замороженого розведення (фіксована частина випадково вибраних вузлів ґратки не зайнята магнітними моментами). Ця межа визначається граничною вимірністю $n_c = n_c(d, \sigma)$, яка для заданої вимірності простору d розділяє різні класи універсальності: вище від цієї межі універсальні критичні показники розведеної моделі збігаються з чистою моделлю, а нижче — модель належить до нового класу універсальності, який зумовлений наявністю слабого замороженого розведення. Використовуючи критерій Гарріса, який визначає межу класу універсальності, контрольованого безладом із критичних показників чистої (нерозведеної) моделі [1], та нещодавні результати теоретико-польової ренормалізаційної групи для чистої моделі з далекосяжною взаємодією [2], ми отримали n_c у вигляді розкладу за $\epsilon = 2\sigma - d$ з точністю до $O(\epsilon^3)$. Оскільки такі ϵ -розклади зазвичай є розбіжними, ми застосовуємо методи пересумовування [3]. Розраховано числові значення для граничної вимірності n_c та здійснено порівняння з даними на основі інших підходів (непертурбативна ренормалізаційна група, NPRG [4]). Для розведеної n -векторної моделі з далекосяжною взаємодією показано, що не тільки ізінгівські системи ($n = 1$) можуть належати до нового класу універсальності, який зумовлений наявністю слабого замороженого розведення за значень вимірності простору $d = 2$ та $d = 3$, але й XY модель ($n = 2$) та класична модель Гайзенберга ($n = 3$) [5].

[1] A. B. Harris, J. Phys. C: Solid State Phys. **7**, 1671 (1974).

[2] D. Benedetti, R. Gurau, S. Harribey, K. Suzuki, J. Phys. A: Math. Theor. **53**, 445008 (2020).

[3] G. A. Baker, Jr., P. Graves-Morris, *Padé Approximants* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1981).

[4] N. Defenu, A. Trombettoni, A. Codello, Phys. Rev. E **92**, 052113 (2015).

[5] D. Shapoval, M. Dudka, Yu. Holovatch, Low Temp. Phys. **48** 1049 (2022).

“QUANTUM WEAK VALUES” OR “WEAK QUANTUM EVOLUTION”?

G. A. Skorobogatko

Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,
gleb.a.skor@gmail.com

This talk (as well as the correct answer to the question in its title) is dedicated to the author’s recent paper [1] where it was shown that the Aharonov–Albert–Vaidman concept of *quantum weak values* [2], in fact, appears to be a consequence of a more general quantum phenomenon of *weak quantum evolution* (see

[1]). The concept of weak quantum evolution has been introduced and discussed for the first time by the author in his paper [1]. As a result, in [1] it has been shown on the level of quantum evolution that there are certain restrictions on the applicability of weak quantum evolution- and, hence, on the applicability of the entire weak values concept [2]. These restrictions are determined by the size N of a given quantum ensemble and by the overlap $\langle f|i \rangle \neq 0$ between pre- and post-selected quantum states $|i\rangle$ and $|f\rangle$. Here the most important restriction from [1] dictates that both the weak quantum evolution of a given quantum system and the quantum weak value of a certain observable between fixed pre- and post-selected quantum states ($|i\rangle$ and $|f\rangle$) of a given quantum system make sense only for *finite and not very large statistical ensembles* of such quantum systems, namely, if the following remarkable condition

$$N \ll \left| \frac{\langle i|\bar{f} \rangle}{\langle i|f \rangle} \right| \quad (0.1)$$

is fulfilled (see [1]). Here N is the “size” of the given statistical ensemble (i.e. the total number of identical quantum systems being each pre- and then post-selected in the same manner during the process of a certain continuous quantum measurement on the ensemble) and two orthogonal quantum states $|f\rangle$ and $|\bar{f}\rangle$ form the complete orthogonal basis of those quantum states which can be post-selected in the given continuous quantum measurement (i.e. the state $|f\rangle$ corresponds to all those outcomes of a certain weakly measured observable which were not post-selected in the process of the given continuous quantum measurement), see [1] for details. The particular realization of the latter requirement is fulfilled for the model system, where the concept of weak values was initially introduced by Aharonov, Albert and Vaidman (see [2] for details). Moreover, a deep connection between *weak quantum evolution* concept and the conventional probability of a quantum transition between two non-orthogonal quantum states has been also established in [1] for the first time. In particular, in [1] it was found that *weak quantum evolution* of a quantum system between its two non-orthogonal quantum states is inherently present in the measurement-determined definition of the probability of a quantum transition between these two quantum states.

[1] G. Skorobagatko, Phys. Lett. A **421**, 127770 (2022).

[2] Y. Aharonov, D. Z. Albert, L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. **60**, 1351 (1988).

150 (і трохи більше) РОКІВ ІСТОРІЇ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ У ЛЬВІВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

А. Ровенчак

Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука

Кафедру фізики у Львівському університеті створено 1784 року, її очолив проф. Ігнац Мартинович (Ignác Martinovics) Майже через століття, на початку 1870-х років, вирішено відкрити окрему кафедру математичної (теоретичної) фізики: у квітні 1872 на посаду приват-доцента математичної фізики прийнято Оскара Фабіана (Oskar Fabian), який наступного року став надзвичайним професором. Зазначимо, що двома десятиліттями раніше, 1850 року, у Львівському університеті Войцех Урбанський (Wojciech Urbański) захистив першу в імперії Габсбургів габілітаційну працю з математичної фізики. Наступником проф. Фабіана на посаді професора математичної фізики став видатний фізик Маріян Смолуховський (Marian Smoluchowski), який працював у Львові до 1913 року й саме тут отримав низку важливих результатів із теорії флуктуацій і браунівського руху, що з'явилися паралельно з працями Альберта Айнштейна. Згодом кафедру обіймали Константи Закшевський (Konstanty Zakrzewski, 1913–18) і Станіслав Лорія (Stanisław Loria, 1919–27).

Протягом 1931–36 кафедру теоретичної фізики очолював Щепан Щеньовський (Szczepan Szczeniowski). У цей період тут також працював Леопольд Інфельд (Leopold Infeld), і саме у Львівському університеті він захистив габілітаційну працю. Співробітники кафедри на ту пору працюють над різноманітною тематикою в таких ділянках теоретичної фізики, як теорія відносності, квантова механіка, теорія поля, нелінійна електродинаміка тощо.

Наступником проф. Щеньовського став Войцех Рубінович (Wojciech Rubinowicz, завідувач у 1937–41, 1944–45), учень якого Василь Міліянчук очолив кафедру після Другої світової війни (1945–1958). У 1949–58 на кафедрі теоретичної фізики працював Абба Глауберман, перший декан фізичного факультету Львівського університету. Із вихованцями його наукової школи — Ігорем Юхновським,

Ігорем Стасюком, Ярославом Дутчаком та ін. — пов'язаний розвиток статистичної фізики та фізики твердого тіла у Львові в другій половині ХХ століття. Після проф. Міліянчука кафедру теоретичної фізики очолювали Ігор Юхновський (1958–1971), Михайло Сеньків (1971–1973), Роман Ґайда (1973–1978), Лаврентій Блажиевський (1978–1984), Іван Вакарчук (1984–2015), Володимир Ткачук (від 2015). Ці імена та пов'язані з ними наукові напрямки — це вже новітня історія кафедри.

ОБЧИСЛЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МІРИ ЗАПЛУТАНОСТІ БАГАТОКУБІТНИХ ГРАФОВИХ СТАНІВ НА КВАНТОВОМУ КОМП'ЮТЕРІ

Н. А. Сусуловська

Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
n.a.susulovska@gmail.com

Квантова заплутаність відіграє роль незамінного ресурсу в різноманітних алгоритмах квантових обчислень та квантових комунікацій, даючи змогу розв'язати задачі, непосильні для класичного комп'ютера. На сьогодні все ще актуальні проблеми кількісної оцінки заплутаності та приготування багатокубітних квантових станів із великою мірою заплутаності. Багато уваги приділяють дослідженням графових станів, які часто використовують у квантовій криптографії, квантовому машинному навчанні, а також квантових алгоритмах корекції помилок.

Ми вивчаємо широкий клас багатокубітних графових станів, утворених дією операторів контрольованого зсуву фази. На відміну від попередніх досліджень [1], розглядаємо випадок, коли всі кубіти системи початково перебувають у довільних станах, кожен з яких характеризується незалежним набором параметрів. Окрім цього, оператори контрольованого зсуву фази, за допомогою яких генерується графовий стан, також характеризуються різними параметрами. Для кількісної оцінки заплутаності таких станів ми оперуємо геометричною мірою заплутаності. Такий вибір особливо доцільний у контексті квантових обчислень з огляду на просте співвідношення геометричної міри заплутаності спіну з його середнім значенням [2].

У межах нашої роботи геометричну міру заплутаності вивчено як на теоретичному рівні, так і на основі квантових обчислень. Зокрема, отримано аналітичний вираз для геометричної міри заплутаності довільного кубіта з рештою системи в стані, який описується довільним графом.

Установлено залежність цієї величини від параметрів початкового факторизованого стану системи та параметрів операторів контрольованого зсуву фази. Також запропоновано протоколи приготування графових станів на квантовому комп'ютері. Для особливих випадків двокубітного графового стану залежність геометричної міри заплутаності від його параметрів розраховано з використанням результатів вимірювань середнього значення спіну на надпровідному квантовому процесорі компанії IBM *ibmq_lima* [3]. Відповідні результати добре узгоджуються з теоретичними передбаченнями.

[1] Kh. P. Gnatenko, N. A. Susulovska, EPL **136**, 40003 (2021).

[2] A. M. Frydryszak, M. I. Samar, V. M. Tkachuk, Eur. Phys. J. D **71**, 233 (2017).

[3] IBM Q Experience. <https://quantum-computing.ibm.com>.

TOPOLOGICAL DATA ANALYSIS METHODS IN THE STUDIES OF THE LARGE SCALE STRUCTURE OF THE UNIVERSE

M. Tsizh^{1,2}, V. Tymchyshyn³

¹Ivan Franko National University of Lviv

²Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna, Italy

³Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Kyiv

We provide a short review of the application of topological data analysis methods in the studies of the large scale structure of the Universe. In particular, we will focus on persistent homology methods, which were widely used during the last decade. Persistent homology exploits a number of notions and tools to reveal and compare complex networks, to which networks of halos naturally belong. Among them - Čech complexes, persistent diagrams, Betti numbers and curves, and bottleneck distances. Having such a toolkit, as we will see, it is possible to study the multiscale nature of the Cosmic Web, to identify large structures (for example voids) in the matter distribution, to investigate continuous fields of HI regions, to probe the Gaussianity of the cosmic perturbations and solve some other problems. Most interesting

for us is the application of persistent homology to the main problem of modern cosmology - determining cosmological parameters of the studied Universe. We have used the above mentioned tools to check whether it is possible to distinguish simulated universes with a different cosmological parameter, namely, σ_8 — the present root-mean-square matter fluctuation averaged over a sphere of radius 8 Mpc. It appears that at least at some redshifts bottleneck distances between different universes increase with the growth of $\Delta\sigma_8$, which means that in principle persistent homology can be used as a cosmological test. We will compare our results to those achieved by other authors and discuss the future prospects of persistent homology in this field.

150 РОКІВ КАФЕДРИ ВИЩОЇ ГЕОДЕЗІЇ ТА АСТРОНОМІЇ ТА 145 РОКІВ АСТРОНОМІЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ ЛЬВІВСЬКОЇ ПОЛІТЕХНІКИ

Л. Янків-Вітковська

Кафедра вищої геодезії та астрономії Національного університету “Львівська політехніка”

У доповіді подано відомості про відкриття у Львівській політехніці 1871 року кафедри вищої геодезії та астрономії і створення в 1877 році Астрономічної обсерваторії. Проаналізовано період становлення природничої науки в Галичині за часів Австрійської монархії, з’ясовано, чому своїм різким практичним піднесенням астрономія у Львові зобов’язана значною мірою геодезії [1]. Подано інформацію про керівників кафедри та Астрономічної обсерваторії від часу заснування до сьогодні, як-от Домінік Зброжек, Вацлав Ласка, Люціан Грабовський та ін. [2].

Описано організаційний характер діяльності кафедри та Астрономічної обсерваторії, підкреслено вагомі результати астрономічних, геодезичних, метеорологічних та сейсмографічних досліджень за весь період функціонування. За хронологічним порядком охарактеризовано основні інструменти Астрономічної обсерваторії, її метеорологічного відділення, сейсмографічної станції та сучасних наукових лабораторій, що працюють із використанням сучасних космічних технологій.

Висвітлено питання підготовки студентів на кафедрі в різні періоди, створення спеціалізацій “Космічний моніторинг Землі” та “Космічна геодезія”, навчального процесу й науково-дослідних робіт з моніторингу фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань [3]. Названо основні досягнення науковців кафедри та Астрономічної обсерваторії, які опубліковані в провідних світових наукових часописах [4].

[1] Л. М. Янків-Вітковська, Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз. **30**, 159 (1998).

[2] С. Савчук, Л. Янків-Вітковська, у *Leopolis Scientifica. Наука у Львові до середини ХХ століття. Частина II: Точні науки*, за заг. ред. О. Петрука (Артос, Львів, 2020), с. 357.

[3] L. Yankiv-Vitkovska *et al.*, in *Scientific and Technical Conference “Our Century. Science for Defense”* (Poznań, 2018), p. 245.

[4] L. Yankiv-Vitkovska, S. Savchuk, in *Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation: Astrogeoinformatics*, edited by P. Škoda and F. Adam (Elsevier, 2020), p. 385.

РЕАКЦІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПРОСТОРИ ДЕ СІТТЕРА

Юрій Яремко

Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів, Україна

Досліджено рух точкового електричного заряду в просторі-часі де Сіттера. Точкова частинка масою m і зарядом q , що рухається вздовж геодезичної, створює електромагнітне поле, що необмежено зростає в точці, де є частинка. Поле визначається електромагнітною функцією Гріна, отриманою Гігучі та Лі [1]. Вирази для напруженості електромагнітного поля частинки підставимо в збережні величини, які відповідають групі ізометрії простору де Сіттера. Розкладемо ці величини на причастинкову (розбіжну) і радіаційну (скінченну) частини. Розбіжні члени поглинаються кінематичними характеристиками частинки в межах процедури перенормування. Радіаційні члени разом із уже перенормованими індивідуальними характеристиками частинки входять у вирази для збережних величин замкнутої системи частинка та її поле. Їхні диференціальні наслідки дають ефективні

рівняння руху радіаційного заряду в зовнішньому електромагнітному полі:

$$\begin{aligned}
& m \left\{ a^\beta - \frac{H^2}{2} \Omega(z) \left[2(z \cdot u) u^\beta + \Omega^{-2}(z) z^\beta \right] \right\} \\
& - \frac{2q^2}{3} \dot{a}^\beta + \frac{2q^2}{3} \Omega^2(z) (a \cdot a) u^\beta + q^2 H^2 \Omega(z) (z \cdot u) a^\beta \\
& + \frac{q^2}{3} H^2 \Omega(z) \left[-\Omega^{-2}(z) + (z \cdot a) - H^2 \Omega(z) (z \cdot u)^2 \right] u^\beta = f_{\text{ext}}^\beta.
\end{aligned}$$

Тут H — стала Габбла; $\Omega(z) = [1 + \frac{1}{4} H^2 (z \cdot z)]^{-1}$ — конформний множник метрики де Сіттера $g_{\alpha\beta}(x) = \Omega^2(x) \eta_{\alpha\beta}$. Рівняння описує еволюцію точкової зарядженої частинки під дією фонові гравітації, зовнішнього електромагнітного поля $f_{\text{ext}}^\beta = g^{\beta\mu} F_{\mu\nu} u^\nu$ і власного електромагнітного поля. Усі тензори віднесені до точки $z(s)$ на світовій лінії частинки, параметризованої власним часом s .

[1] A. Higuchi, Y. C. Lee, Phys. Rev. D **78**, 084031 (2008).

[2] A. Duviryak, J. Phys. Stud. **26**, 3002 (2022).

ON UNIVERSAL PROPER METRIC SPACES OF ASYMPTOTIC DIMENSION 1

Mykhailo Zarichnyi

Ivan Franko National University of Lviv

zarichnyi@yahoo.com

Asymptotic topology (coarse geometry) is a part of mathematics which deals with large scale properties of metric spaces, finitely generated groups, and more generalized objects (coarse spaces).

One of the most important coarse invariants of metric spaces is the asymptotic dimension introduced by Gromov [4]. A family \mathcal{A} of subsets of a metric space X is called uniformly bounded if there is $M > 0$ such that $\text{diam}(A) \leq M$, for every $A \in \mathcal{A}$. Given $D > 0$, we say that a family \mathcal{A} is D -discrete if $d(A, B) = \inf\{d(a, b) \mid a \in A, b \in B\} \geq D$ for every distinct $A, B \in \mathcal{A}$.

We say that the asymptotic dimension of X is $\leq n$ (written $\text{asdim } X \leq n$) if for every $D > 0$ there exists a uniformly bounded cover \mathcal{U} of X such that $\mathcal{U} = \cup_{i=0}^n \mathcal{U}_i$, where every \mathcal{U}_i , $i = 0, 1, \dots, n$, is D -discrete.

Universal spaces for the asymptotic dimensions $\leq n$ (we do not provide here a precise definition) are constructed in [3] and [1].

Recall that a metric space X is proper if every closed ball in it is compact.

It is proved in [5, Theorem 7.2] that there exists a countable proper ultrametric space PU such that any proper metric space X of asymptotic dimension 0 coarsely embeds (see the definition below) in PU . In other words, there is a universal proper metric space of asymptotic dimension 0.

The aim of the talk is to show that there is no universal proper metric space of asymptotic dimension n , where $n \geq 1$. Our construction is based on some properties of coarse embeddings of geodesic metric spaces proved in [2].

[1] G. C. Bell, A. Nagórko, Topol. Appl. **160**, 159 (2013).

[2] A. Dranishnikov, Uspekhi Mat. Nauk **55**(6(336)), 71 (2000).

[3] A. Dranishnikov, M. Zarichnyi, Topol. Appl. **140**, 203 (2004).

[4] M. Gromov, in *Asymptotic invariants for infinite groups, in Geometric Group Theory*, vol. 2, edited by G. Niblo, M. Roller (Cambridge University Press, 1993), p. 1.

[5] Y. Ma, J. Siegert, J. Dydak, preprint arXiv:2203.05329 (2022).

ENTANGLEMENT OF GRAPH STATES OF SPIN SYSTEM WITH HEISENBERG INTERACTION

Sviatoslav Tymyk

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics, Ivan Franko National University of Lviv
xsvtsx@gmail.com

Multi-qubit graph states with the Heisenberg interaction are studied. Expressions are found that describe the evolution of the binary tree system and the cycle graph system with time, and analytical expressions for the geometric measure of entanglement of a spin with other spins for the graph states that are represented by binary tree graphs and cycle graphs are obtained. The obtained results are compared with theoretical ones and the corresponding graphs are built. The results obtained for the geometric measure of entanglement on a quantum computer are in good agreement with theoretical ones.

СПІВПРАЦЯ КАФЕДР ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ФІЗИКИ

А. С. Волошиновський

Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра експериментальної фізики

Кафедри теоретичної та експериментальної фізики, виникнувши одночасно, ось уже впродовж 150 років підтримують тісні наукові контакти, які спонукали кафедру експериментальної фізики викристалізувати науковий напрям — оптика та спектроскопія. Зародження цього актуального на десятки років напряму можна простежити в іменах учених, які працювали від початку 20 століття [1].

Вагомий внесок у розвиток спектроскопічних досліджень зробив Маріан Смолуховський (зав. каф. теор. фізики, 1898–1913 рр.), кімната-музей якого тепер в приміщеннях кафедри експериментальної фізики. Закшевський Константій, надзвичайний професор каф. експ. фізики, професор каф. теор. фізики (1908–1918), цікавився оптикою металів, зв'язком між електронною підсистемою та оптичними властивостями. Станіслав Лорія, який у різні періоди завідував кафедрою теоретичної (1918–27 рр.) та експериментальної фізики (1927–1941 рр.), започаткував дослідження флуоресценції, поглинання в ділянці аномальної дисперсії світла. Щепан Щеньовський (зав. каф. теор. фізики, 1931–36 рр.). Його юююююдисертація д-ра філософії була присвячена фотолюмінесценції розчинів. Зрештою, люмінесцентне матеріалознавство стало одним із визначальних напрямів досліджень на каф. експ. фізики (В. Н. Вишневський, М. С. Підзираило). Войцех Рубінович (зав. каф. теор. фізики, 1937–41 рр., 44–45 рр.) започаткував дослідження в галузі теорії електромагнітного випромінювання, сформулював правила відбору для дипольного та квадрупольного випромінювання.

Міліянчук Василь Степанович (зав. каф. теор. фіз., 1945–58 рр.) — один із засновників Львівської школи спектроскопії. Дослідження з атомної спектроскопії, проведені на каф. експер. фізики, підтвердили розрахунки В.С. Міліянчука щодо нових ліній мультиплетів у неоднорідному електричному полі (В. С. Міліянчук, Л. К. Клімовська, І. Лазарев).

Володимир Броніславович Кобилянський (доцент каф. теор. фізики 1980–87 рр.) разом зі співробітниками каф. експ. фіз. (О. Г. Влохом, Л. А. Лазьком, І. М. Клімівим) досліджували оптичні властивості оптично активних кристалів на основі феноменологічної теорії поширення світла в гіротропних кристалах, що дало змогу обґрунтувати електрогірацію.

Стасюк Ігор Васильович (каф. теор. фізики, чл.-кор. НАН України) разом із Левицьким Романом Романовичем, Попелем Олександром Михайловичем (доц. каф. теор. фізики, 1980–2007 рр.) започаткували розвиток мікроскопічної теорії індукованих оптичних переходів у сегнетоелектричних кристалах, що дало змогу науковцям каф. експ. фізики (Романюк М.О) успішно пояснити температурні залежності електрооптичних та п'єзоелектричних коефіцієнтів сегнетоелектриків.

Вагомий внесок у розвиток досліджень у галузі нанофізики зробив факультетський науковий семінар “Фізика–10⁻⁹”, який ініціював 2004 року ректор Львівського національного університету імені Івана Франка, завідувач каф. теор. фіз. Вакарчук Іван Олександрович. Сьогодні кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука є прикладом для інших кафедр факультету в інноваційних підходах до організації навчального та наукового процесу, зокрема, ініціювавши нову спеціальність “Квантові комп'ютери та квантове програмування”.

[1] І. Вакарчук, П. Якібчук, О. Миколайчук, О. Попель, *Фізичний факультет Львівського національного університету імені Івана Франка (1953–2013)* (ЛНУ імені Івана Франка, 2013).